

老旧石拱桥加固结构损伤检测方法

郑其华^{1,*} 薛 齐²

(1. 云南交通职业技术学院, 昆明 650000; 2. 浙江交投交通建设管理有限公司, 杭州 310000)

摘 要 为了解决老旧石拱桥因水流冲击导致的砂浆脱离和开裂下沉等安全隐患, 延长其使用寿命, 提出基于几何形态重建的老旧石拱桥加固结构损伤多波段红外检测方法。结合图像预处理技术剔除干扰因素, 并构建高维度像素矩阵, 采用边缘检测与细化技术, 还原损伤区域的几何形态。通过高斯分布模型对重构后的损伤区域进行深入剖析, 揭示损伤的内部结构特征, 得到的多波段红外检测结果与真实损伤完全一致, 最高的丢失率结果为 0.071。本文提出的检测方法可为老旧石拱桥的加固维护提供技术支持。

关键词 损伤检测, 老旧石拱桥, 加固结构, 几何形态重建, 多波段红外检测, 加固结构损伤
中图分类号: U445.7 **文献标志码**: A **DOI**: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0005

Damage Detection Method for Reinforced Structure of Old Stone Arch Bridge

ZHENG Qihua^{1,*} XUE Qi²

(1. Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming 650000, China;
2. Zhejiang Jiaotou Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract In order to address safety hazards such as mortar detachment, cracking, and sinking caused by water flow impact on old stone arch bridges, and to extend their service life, a multi band infrared detection method for structural damage of reinforced old stone arch bridges based on geometric shape reconstruction is proposed. By combining image preprocessing techniques to eliminate interference factors and constructing a high-dimensional pixel matrix, edge detection and refinement techniques are used to restore the geometric shape of the damaged area. By using Gaussian distribution model to conduct in-depth analysis of the reconstructed damaged area, the internal structural characteristics of the damage are revealed. The obtain a multi band infrared detection result that is completely consistent with the actual damage, with the highest loss rate result being 0.071. The detection method proposed in this article can provide technical support for the reinforcement and maintenance of old stone arch bridges.

Keywords damage detection, old stone arch bridge, strengthening the structure, geometric reconstruction, multi band infrared detection, strengthening structural damage

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 云南交通职业技术学院科学研究重点基金项目(2023KJ002)

* 联系作者: 郑其华(1973-), 男, 汉族, 云南昆明人, 工程硕士(建筑与土木工程领域), 副教授/高级工程师, 主要研究方向为道路与桥梁工程勘察、设计、施工、检测等专业技术理论研究及实践应用。E-mail: taohuantaomog@163.com

0 引言

石拱桥在我国有着十分悠久的历史,是我国传统的四大基本桥梁形式之一。然而,伴随着石拱桥使用时间的增加,很多石拱桥出现了老旧现象。受到水流的冲击,石拱桥的砂浆脱离现象较为严重,造成开裂或下沉等安全隐患。为了延长老旧石拱桥的使用年限,技术人员使用加固结构对老旧石拱桥进行加固。加固结构的质量对老旧石拱桥的安全质量将起到关键作用。基于此,对服役期内加固结构自身出现的损伤进行精准检测,已成为评估加固效果、保障桥梁长期安全的关键,也是相关领域专业人员的关注方向之一。在对损伤进行检测过程中,红外检测技术是一项应用极为广泛的技术内容。对此,很多研究人员提出了红外检测方法。

文献[1]采用数值模拟软件对研究对象进行模拟仿真,对初始参数进行设定。将建立的模型代入室内实验的环境中,测定自然的温差条件。在真空状态下,对材料的热传导规律进行分析,解析材料原子的动态变化过程。采集材料的红外热图像,获取材料的内外温差图像,分别分析材料内表面和外表面的红外图像温度变化,得到材料在自然环境参数下的温度变化规律,根据该变化规律对材料的温度突变位置进行分析,得到不符合规律的材料红外温度,完成红外检测过程,该方法检测要求较高。文献[2]获取了检测对象的三维曲面结构,以此来建立其三维结构模型。对检测对象的材料特性进行解析,获取材料参数,将得到的参数代入该模型中。搭建红外检测的实验平台,计算红外激励参数。在该实验平台中的一侧设置局部热风,在这样的情况下获取研究对象的红外图像。将红外图像进行三维转化处理,代入三维模型结构中,采用 Canny 算子对模型变化进行分析。使用模型控制算子,对模型的参数进行调节,逐级增大热扩散系数,分析温度变化规律,进而得出红外检测结果,该方法检测效率不高。文献[3]对检测对象的红外图像进行全方位获取,再与其可见光图像进行对比分析,将两种图像特征进行融合,获取融合后的光谱信息。采用单阶段的网络架构进行光谱信息分析,截取光谱特征分布不均匀的长宽比分布特点,建立无锚框的检测框架,使用 Tensor RT 对特征参数进行加速,对

检测特征进行改进。构建金字塔结构的检测结果分析模型,对其进行多尺度结合,得到最终的红外检测结果,该方法检测结果精准度不高。

考虑到上述文献所提出的红外检测方法均因环境依赖性高、模型复杂或检测精度有限而不适用于老旧石拱桥加固结构的现场精准检测,本研究以几何形态重建为工具,提出一种老旧石拱桥梁加固结构损伤多波段红外检测方法。该方法通过采集多波段的红外图像,并进行损伤部位的特征分析,早期发现损伤并精确掌握其几何形态和内部特性,实现较为精确的加固结构损伤检测过程。

1 老旧石拱桥加固结构损伤检测方法

1.1 预处理多波段红外图像

石拱桥加固结构中的水泥砂浆和钢筋在特定红外波段具有显著的热辐射差异,能够清晰反映损伤部位的温度异常,且对日光反射和大气水分吸收的敏感性较低,可有效减少环境干扰。因此,可在外界环境温度影响较小的时间段进行老旧石拱桥梁加固结构红外图像的采集,获取多波段的红外图像。多波段的红外图像预处理过程包括噪声去除和图像增强两个关键步骤。噪声去除,即通过计算图像稀疏度和邻域灰度值动态设定去噪阈值,剔除高频噪声实现。在多波段下,红外图像的辐射亮度可采用公式(1)计算^[4]:

$$L = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M \left(\frac{d}{h} \right) \quad (1)$$

式中: L 表示辐射亮度; M 表示红外波段检测范围; d 表示红外图像照射距离; h 表示普朗克常量; λ_1 和 λ_2 分别表示红外图像获取的两个波段。

对采集得到的老旧石拱桥梁加固结构红外图像进行预处理。通过计算红外图像的灰度值进行去噪处理过程^[5]。红外图像的稀疏度可采用公式(2)计算:

$$D = \min \| L \|_0 \quad (2)$$

式中: D 表示图像稀疏度。

根据式(2)的计算结果,对图像灰度值进行区域求和运算。获取红外图像中一个中心点像素的灰度值,结合以该像素点为中心的四周九宫格中的8个邻域像素点的灰度值进行计算,保证其在

非特定窄波段内也有明显的红外信号表现^[6]。两个灰度值的绝对值之和可采用公式(3)计算:

$$b = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 |I_{i'} - I_i|^D \quad (3)$$

式中: b 表示灰度值绝对值之和; i' 和 i 分别表示中心像素点邻域点以及中心像素点; $I_{i'}$ 和 I_i 则分别表示两个点位对应的灰度值。

根据红外图像的灰度值,图像去噪的阈值可采用公式(4)计算:

$$w = \begin{cases} w_{i,i'} |w_{i,i'} - r|, w_{i,i'} > r \\ 0, w_{i,i'} \leq r \end{cases} \quad (4)$$

式中: w 表示去噪阈值; $w_{i,i'}$ 表示像素点及其邻域的噪声值; r 表示临界值。

根据公式(4)的计算结果,将图像中大于该阈值的噪声点进行去除,实现对老旧石拱桥梁加固结构的多波段红外图像的去噪处理,完成多波段红外图像的预处理过程。

1.2 提取桥梁加固结构损伤图像特征

获取高质量表面温度分布数据后,将数据映射到一个特定的区间($[-1, 1]$),如果在某个坐标点处,既有超声波检测到的内部缺陷信息,又有红外检测到的表面温度异常信息,则将这些信息组合在一起。图像增强过程,利用正交矩阵变换提取损伤区域的能量分布,强化弱信号。老旧石拱桥梁加固结构的红外图像像素矩阵可采用式(5)计算:

$$A = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: A 表示红外图像像素矩阵; x 表示图像像素点; m 和 n 分别表示矩阵的大小。

正交矩阵与红外图像像素矩阵进行正相乘可采用公式(6)计算^[7-9]:

$$V = A \otimes \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: V 表示正交矩阵; v 表示矩阵中的像素特征。

将得到的矩阵在对应的特征子空间进行对应,获取空间中的特征点奇异值^[10]。损伤特征奇异值通过线性加权 and 计算,能够有效量化损伤的面积和深度特征。将这些奇异值进行线性叠加,

对损伤特征奇异值在空间中的比例进行计算,损伤特征奇异值对应的红外图像能量可采用式(7)计算:

$$E_i = \sum_{i=1}^q \sigma^2 \quad (7)$$

式中: E_i 表示损伤特征红外图像能量; σ 表示损伤特征奇异值; q 表示线性加权值。

按照损伤特征红外图像能量的数值,对损伤特征的边缘能量进行细化,损伤特征的细节分量可采用公式(8)计算^[11]:

$$Q = \sum_{i=q/2}^{q/2} u \frac{v}{E} \quad (8)$$

式中: Q 表示特征点的细节分量^[12]; u 表示近似分量; v 表示二分能量值。

将老旧石拱桥梁加固结构损伤特征的细节分量进行点位融合,损伤特征点位的红外图像可采用公式(9)计算^[13]:

$$\begin{cases} \hat{A} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_k) \\ Q_k = \sum_{i=q/2}^q u \\ A_k = \sum_{i=q/2}^{q/2} \sigma \end{cases} \quad (9)$$

式中: \hat{A} 表示重构后的红外图像像素矩阵; Q_k 表示第 k 层细节分量; k 表示细分解层级; A_k 表示层级矩阵。

通过上述过程,实现老旧石拱桥梁加固结构损伤图像特征的提取。

1.3 重建加固结构损伤特征几何形态

老旧石拱桥梁在结构加固过程中,结构损伤主要表现为以下几个方面:

(1) 冲刷与侵蚀:长期受到河水的冲刷与侵蚀,墩台底部的基石可能被冲刷走,导致墩台被掏空,桥体稳定性下降。

(2) 风化与裂缝:条石表面风化严重,尺寸减小,桥的两侧出现大量顺桥向、横桥向的裂缝,裂缝宽度多为中间突出,向两边延伸逐渐减少。

(3) 不均匀沉降:由于台内填土不够密实或排水不畅,导致填土发生不均匀沉降,进一步加剧结构损伤。

(4) 开裂:主拱圈是石拱桥的主要承重结构,常因基础位移、整体强度不足或施工质量问题出现顺桥向、横桥向开裂,裂缝多为中间宽深,两边细小。

细节分量包括裂缝的具体位置、宽度、深度以及材料的风化程度等,需要利用提取得到的加固结构损伤的图像特征,对其进行几何形态的重建,将检测结果可视化,便于标记出轮廓上的关键点位(如转折点、曲率最大点等),这些点位包含了关于损伤几何形态的重要信息,进一步选择合适的几何模型来重建损伤的几何形态。

如果损伤特征涉及深度信息(例如从立体成像或多视角成像中获取),则可以构建三维曲面函数,将离散的三维点位连接成三角形面片,从而构建出损伤区域的三维几何形态,将损伤特征的点位代入高斯函数,采用公式(10)计算:

$$G = \frac{1}{2\pi\delta} \exp\left(-\frac{y^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

式中: G 表示高斯函数分布; δ 表示高斯方差; y 表示平滑因子。

如果损伤区域具有曲线边界,例如类似椭圆或不规则曲线形状,可以采用样条曲线拟合方法,通过给定的边界点位,拟合出光滑的曲线,以准确表示损伤区域的边界,即根据高斯函数对损伤部位的边缘进行表达,将融合后的损伤特征值(如温度异常值或综合损伤指标值)赋给对应的图像像素点,使得损伤严重的区域在图像中以明显的颜色显示出来。

根据高斯函数对损伤部位的边缘进行表达,如图 1 所示。

0	0	-2	-2	-2	-2	-3	0	0
0	-2	-3	-5	-5	-5	-3	-2	0
-3	-3	-5	-7	0	-5	-5	-2	-3
-2	5	-3	-1	-2	-3	-3	-3	-2
-2	5	0	23	4	0	-5	-5	-2
-2	5	-3	12	7	5	-3	-5	-2
-3	-3	-5	0	-3	-5	-5	-3	-3
0	-2	-3	-2	-5	-5	-3	-2	0
0	0	-3	-3	-2	-2	-3	0	0

图 1 损伤部位高斯分布图

Fig.1 A Gaussian distribution map of the injury site

通过如图 1 所示的高斯分布图,得到损伤部位的形状特征以及分布位置。根据高斯分布的数值在老旧石拱桥梁加固结构对应大小的立方体结

构中进行重建,同时完成损伤部位内部与外部的形态特征,得到损伤部位最终的几何形态结果。

通过上述步骤,完成几何形态重建下的老旧石拱桥梁加固结构损伤多波段红外检测。

2 石拱桥加固结构损伤检测实验

2.1 实验准备

设计实验对本文所提出的老旧石拱桥梁加固结构损伤多波段红外检测方法进行验证。本次实验以建立石拱桥阶段模型的形式进行。

以某座老旧石拱桥作为本次实验的研究对象,该石拱桥自建立迄今已有 34 年,中心桩号为 K43+156,其建设概况如表 1 所示。

表 1 老旧石拱桥建设概况

Table 1 Construction overview of the old stone arch bridge

项目	建设参数
桥梁全长	213.8 m
桥梁净宽	10.6 m
桥梁人行道宽度	2×1.0 m
桥面坡度	双向 1.5%
桥矢跨比	1/8
主拱圈高度	0.5 m
主拱圈厚度	0.6 m
设计荷载	汽车-15 级

对该老旧石拱桥进行勘测,得到其加固方案为保留该石拱桥的原拱圈,将石拱桥上部的表面结构进行拆除,对桥台进行加固,于石拱桥的桥顶加装一个板梁式的加固结构,如图 2 所示。

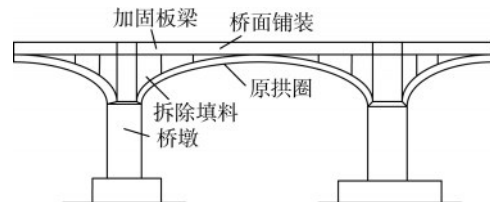


图 2 老旧石拱桥加固结构

Fig.2 Reinforcement structure of the old stone arch bridge

根据勘测所得的信息,制作本次实验所用的加固结构试件,如图 3 所示。

按照如图 3 所示的结构制作加固结构的实验试件。加固结构试件的制作参数如表 2 所示。

本次实验共制作 10 组试件,每组试件 50 个。采用 YES-500 型号的液压式压力机对制作的加固结构试件进行随机损坏。每组加固结构试件采用

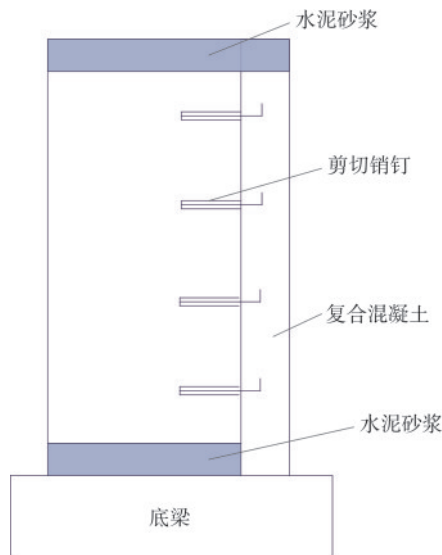


图3 老旧石拱桥加固结构试件
Fig.3 The reinforced structural specimens of the old stone arch bridge

表2 加固结构试件参数

Table 2 Parameters of reinforced structural test specimens

项目	参数
纵向钢筋间距	90 mm
横向钢筋间距	200 mm
水泥砂浆厚度	15 mm
剪切销钉深度	90 mm
底梁尺寸	200 mm×97 mm×70 mm
钢筋材质	φ4 冷轧带肋钢筋
底梁尺寸	200 mm×97 mm×70 mm
保护层厚度	15 mm 水泥砂浆覆盖层

不同等级的压力进行损坏,最高压力为 5 000 kN,稳压 1~2 min,直至试件损伤达到稳定状态,形成加固结构试件的最终损伤形态。YES-500 型号液压式压力机设备如图 4 所示。



图4 YES-500 型号液压式压力机
Fig.4 YES-500 hydraulic press

本次实验中,采用 A35 相机作为红外图像的采集设备。该相机的参数配置如表 3 所示。

表3 红外相机参数配置

Table 3 Parameters of infrared camera

参数项	参数配置
空间分辨率	320×256
水平视场角	39°
红外电磁波感知范围	7.5~13 μm
同步频率	20 Hz
偏移距离	2.5D

由表 3 可知,7.5~13 μm 红外波段对日光反射和大气水分吸收的敏感性较低,对检测环境(如昼夜温差、湿度)具有一定鲁棒性。红外相机配置 20 Hz 同步频率和 2.5D 偏移距离,可部分抵消环境震动或轻微位移引起的图像偏差。在如表 3 所示配置的红外相机前端安装一个分束器,将红外波段传输至红外传感器中,可有效减少强光散射对传感器的影响。本次实验中所使用的红外相机及分束器如图 5 所示。



图5 实验设备

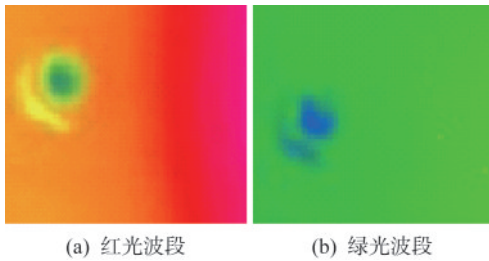
Fig.5 Experimental equipment

在硬件环境中,结合 MATLAB 中的图形绘制函数,使用 JavaScript 库,绘制损伤结构几何形态,为一个二维图像中的多边形损伤区域,在选定的可视化工具中,按照多边形的顶点坐标绘制出多边形的形状。对于曲线边界的损伤区域,绘制出拟合的样条曲线,通过颜色填充来表示损伤区域。在三维可视化中,添加坐标轴、比例尺等辅助元素,反映出损伤的某种扩散特性或者能量分布特征。

2.2 加固结构损伤多波段红外检测

对本文所提出的几何形态重建下的老旧石拱桥梁加固结构损伤多波段红外检测方法进行可行性测试。

随机选择加固结构试件,以 6 组 42 号试件为样本进行损伤检测,分别采用不同波段的光波进行检测,得到试件的红外图像如图 6 所示。



(a) 红光波段 (b) 绿光波段

图 6 加固结构试件多波段红外图像

Fig.6 Multi-band infrared image of the reinforced structural specimens

由图 6 可知,在该试件的多波段红外图像中,含有一个点状的损伤部位,在该部位外围含有一个圆弧状的条状损伤。根据该图像,进行几何形态的重建,如图 7 所示。

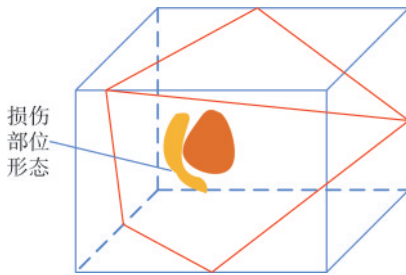


图 7 加固结构试件损伤几何形态重建

Fig.7 Reconstruction of damage geometry of reinforced structural specimens

如图 7 所示,对根据测得的加固结构试件红外图像进行损伤部位的几何形态重建。将重建所得的损伤检测结果与 6 组 42 号试件进行对比,得知该检测结果的损伤部位、形态及大小与试件的真实损伤完全一致。从这一检测结果可以初步判断,本研究所提出的几何形态重建下的老旧石拱桥梁加固结构损伤多波段红外检测方法检测结果较为精确,表明本文所提方法能够精确关联奇异值与损伤程度,为定量分析提供了可靠依据,本文所提方法在老旧石拱桥梁加固结构损伤检测实践中具备一定的可行性。

由此可知,所提方法几何形态重建的精度不完全依赖高分辨率图像,当前 320×256 分辨率下,通过调整高斯分布的平滑因子可适配低分辨率图像;通过线性加权奇异值,强化了损伤特征的显著性,部分补偿了因分辨率不足而导致的信息损失;多波段数据提供了冗余信息,降低了单一波段分辨率的影响。若分辨率较低,可能影响细节但不会显著破坏整体重建效果。

2.3 结果评价指标

为了更加直观地体现出本研究所提检测方法的有效性,将本次实验的结果评价指标设置为检测结果的丢失率,采用对数平均的方法对丢失率进行计算,丢失率可采用公式(11)计算:

$$R = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (\log x f_i) \quad (11)$$

式中: R 表示检测结果丢失率; x 表示绝对值平均量; f_i 表示检测结果准确率与召回率的比值。

丢失率的计算结果直接反映了对石拱桥加固结构损伤检测的有效性。计算所得的丢失率结果数值越小,则说明该方法的检测结果相比于真实损伤情况更一致,丢失的损伤部位越少,整体检测性能更优质。

2.4 实验结果分析与讨论

为了体现本研究所提石拱桥加固结构损伤检测方法的实验结果有效性,分别应用文献[1]和文献[2]所提出的红外检测方法共同进行本次损伤检测实验。将三种得到的检测结果进行横向对比,进行指标分析,得到不同检测方法的实践有效性。

分别采用三种检测方法对 10 组加固结构试件进行损伤检测实验。在每个方法的检测实验结束后,对试件进行检查,确保实验过程中未对试件造成额外的损伤,检查无误后,方可进行下一检测方法的实验。

经过实验,得到不同方法的老旧石拱桥加固结构损伤红外检测结果,如图 8 所示。

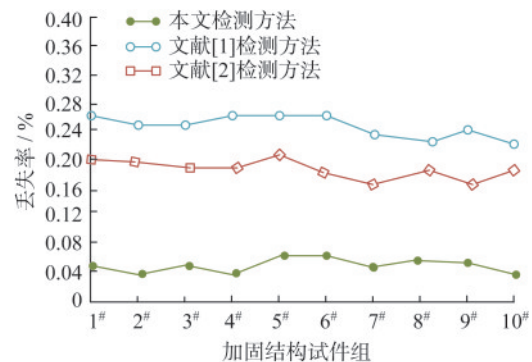


图 8 不同方法损伤红外检测结果

Fig.8 Injury-IR detection results of different methods

由图 8 可知,本文所提方法在 10 组老旧石拱桥加固结构试件的损伤检测结果中,丢失率始终

较低,最高的丢失率结果为0.071,而文献[1]和文献[2]所提方法检测结果的最高丢失率分别为0.262和0.218。在10组的损伤检测实验结果中,本文所提方法的平均丢失率为0.047,而其他两种方法的平均丢失率分别为0.256和0.194,对比可知,本文所提方法可以用损伤区域的中心位置(均值)、分布范围(标准差)等参数精准地确定损伤区域的边界,识别出损伤区域与正常区域之间像素值变化剧烈的地方,从而勾勒出损伤区域的轮廓;用损伤区域的能量(与高斯分布的幅度相关)、损伤的集中程度(与标准差相关)等描述损伤区域内各种特征(如温度、应变等物理量)的分布规律,突出显示这些微小损伤的边缘,了解损伤的扩散趋势或者损伤程度的变化情况。

为了体现本研究所提石拱桥加固结构损伤检测方法的适用性,应用文献[1]检测方法作为对比实验,针对石拱桥加固结构典型损伤(裂缝、露筋锈蚀)开展对比检测,实验采用相同试件及环境条件,通过多波段红外成像(7.5~13 μm)与文献[1]检测方法同步采集数据。将两种方法所测得的检测缺陷类型结果进行对比,得到不同方法检测缺陷类型对比结果,如图9所示。

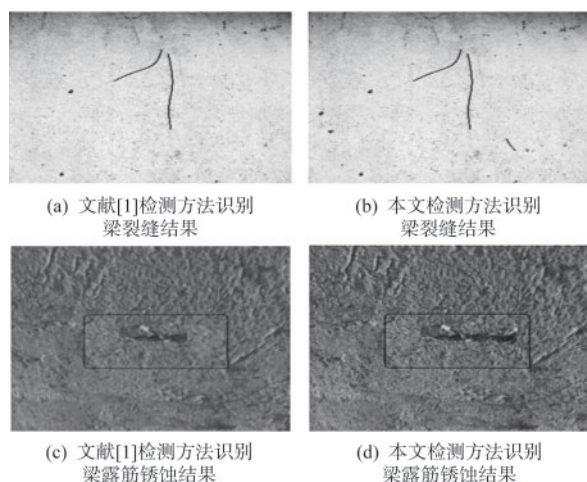


图9 不同方法检测缺陷类型对比结果

Fig.9 Comparison results of different methods for detecting defect types

由图9可知,本文提出的多波段红外检测方法在损伤识别精度和完整性方面显著优于传统方法。在裂缝检测方面,本文检测方法不仅能清晰识别主裂缝形态,还可检出宽度更为微小的微裂纹,而文献[1]检测方法仅能检测到主裂缝且边缘模糊;在露筋锈蚀检测方面,通过奇异值加权处

理,本文检测方法可准确呈现锈蚀区域与钢筋轮廓,而文献[1]检测方法因热扩散干扰导致锈蚀边界识别出现明显偏差。以上表明本方法采用的多波段融合技术与几何形态重建算法在复杂损伤检测中具有更好的适用性,在微细损伤和隐蔽缺陷识别方面表现出更强的鲁棒性。

从对比实验的结果可以看出,本文所提出的老旧石拱桥梁加固结构损伤检测方法,展现出的检测结果较为准确且较为全面,能够有效对老旧石拱桥梁加固结构的损伤进行检测,在老旧石拱桥及其加固结构的勘测维护工作中,能够起到十分关键的辅助作用,能有效提高石拱桥运维工作的质效,具备较高的实践应用价值。

3 结 语

本研究成功将多波段红外检测技术应用于老旧石拱桥梁加固结构的损伤检测,具有非接触、快速、全面且能穿透表面覆盖层的显著优势,通过几何形态重建技术深化了检测的全面性和准确性,彰显了其低丢失率、高质量、高适用性的检测优势,精准识别并定位了潜在损伤,为桥梁维护提供了精准数据支持。

多波段红外结合几何重建的检测方法显著提升了老旧桥梁损伤检测的效能,为及时发现并处理安全隐患提供了科学手段,其成果对桥梁检测技术的发展具有重要意义,并为类似结构检测提供了宝贵参考。然而,研究亦指出检测效率与极端环境条件下的效果有待优化,未来工作应聚焦于算法优化、检测波段拓展及实地验证,以进一步提升技术的适用性和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 刘学增,杨学良,杨芝璐,等.自然条件下隧道衬砌浅层钢筋锈蚀的热效应与红外检测方法[J].岩土工程学报,2023,45(4):680-689.
LIU Xuezheng, YANG Xueliang, YANG Zhilu, et al. Thermal effects and infrared detection method for shallow reinforcement corrosion in tunnel linings under natural conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 680-689. (in Chinese)
- [2] 王浩,吴易泽,王涛.基于阵列热风激励的航发叶片近表面缺陷红外检测方法[J].红外技术,2022,44(10):1112-1117.

- WANG Hao, WU Yize, WANG Tao. Infrared detection of near surface defects of aeroengine blade based on array hot air excitation [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(10): 1112-1117. (in Chinese)
- [3] 康硕, 柯臻铮, 王璇, 等. 基于红外和可见光图像融合的铺丝缺陷检测方法 [J]. *航空学报*, 2022, 43(3): 564-576.
- KANG Shuo, KE Zhenzheng, WANG Xuan, et al. Detection method of defects in automatic fiber placement based on fusion of infrared and visible images [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(3): 564-576. (in Chinese)
- [4] 黄悦华, 杨楚睿, 陈晨, 等. 基于改进 Centernet 的变电设备红外检测方法 [J]. *电子测量技术*, 2023, 46(4): 142-148.
- HUANG Yuehua, YANG Churui, CHEN Chen, et al. Infrared detection method of substation equipment based on improved Centernet [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(4): 142-148. (in Chinese)
- [5] 朱金艳, 朱玉杰, 冯国红, 等. 基于深度信念网络与混合波长选择方法的蓝莓糖度近红外检测模型优化 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(12): 3775-3782.
- ZHU Jinyan, ZHU Yujie, FENG Guohong, et al. Optimization of near-infrared detection model of blueberry sugar content based on deep belief network and hybrid wavelength selection method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(12): 3775-3782. (in Chinese)
- [6] 陶玉宁, 方春华. 考虑环境相对湿度和污秽度的零值绝缘子红外检测方法 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 141-148.
- TAO Yuning, FANG Chunhua. Infrared detection method of zero value insulator considering relative humidity and pollution degree [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1): 141-148. (in Chinese)
- [7] 黄维蓉, 胡邦胜, 肖成明, 等. 基于行车振动的桥梁加固用混凝土体积变形性能研究 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(4): 121-127.
- HUANG Weirong, HU Bangsheng, XIAO Chengming, et al. Study on volume deformation performance of concrete for bridge reinforcement based on driving vibration [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(4): 121-127. (in Chinese)
- [8] 张许. 后加钢支撑加固铁路既有简支桥梁共振响应分析 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(2): 118-127.
- ZHANG Xu. Resonance analysis of existing simply-supported railway bridge strengthened with adding steel braces [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2023, 45(2): 118-127. (in Chinese)
- [9] 王艳, 刘哲, 周瑞娇, 等. 基于车桥耦合振动分析的大跨径曲弦桁梁桥加固方案评价研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(14): 199-209.
- WANG Yan, LIU Zhe, ZHOU Ruijiao, et al. Evaluation of the reinforcement scheme for a long-span curved truss bridge based on vehicle-bridge coupled vibration analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(14): 199-209. (in Chinese)
- [10] 龚凌冉, 贾希宇, 徐媛媛, 等. 基于正交双波长测量的有核细胞三维形态重建 [J]. *中国激光*, 2022, 49(20): 117-125.
- GONG Lingran, JIA Xiyu, XU Yuanyuan, et al. Three-dimensional morphological reconstruction of nucleated cell based on orthogonal dual-wavelength measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(20): 117-125. (in Chinese)
- [11] 季颖, 黄锦槟, 李响, 等. 基于正交采样的相位体三维形态快速重建算法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 164-173.
- JI Ying, HUANG Jinbin, LI Xiang, et al. Fast three-dimensional morphological reconstruction algorithm of phase objects based on orthogonal sampling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 164-173. (in Chinese)
- [12] 林代恒, 张忠祥. 立体交叉石拱桥爆破拆除振动危害控制 [J]. *爆破*, 2023, 40(1): 132-138, 176.
- LIN Daiheng, ZHANG Zhongxiang. Vibration hazard control of blasting demolition of interchange stone arch bridge [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 132-138, 176. (in Chinese)
- [13] 赵超, 戴志成, 钟新谷, 等. 基于 Cohesive 单元的石拱桥主拱圈二相数值模拟方法 [J]. *工程力学*, 2021, 38(12): 97-106, 117.
- ZHAO Chao, DAI Zhicheng, ZHONG Xingu, et al. A two-phase modeling method based on cohesive elements for masonry arches [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(12): 97-106, 117. (in Chinese)